

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАТЕРИАЛА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

### THE EFFECT OF THE STRUCTURAL HETEROGENEITY OF THE MATERIAL ON THE RESISTANCE OF STRUCTURAL MEMBERS TO FRACTURE

В.И. Миронов, ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, [visim.vm@mail.ru](mailto:visim.vm@mail.ru)  
В.Б. Трухин, ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, [tvb@imach.uran.ru](mailto:tvb@imach.uran.ru)

#### Abstract

*The use of stronger steels is the main way of reducing metal consumption of products. However this enhances the risk of brittle fracture of a structure. Crack toughness can be reduced, e.g., by increasing the structural homogeneity of the material thus making it stronger. This is verified by modelling and non-standard testing of some engineering materials, the results being useful for solving the problem of increasing the functional reliability of machines.*

Подавляющее большинство работ по проблеме разрушения материалов и конструкций выполняются в развитие и обоснование энергетической концепции Гриффитса. Несмотря на то, что решения задач механики трещин, полученные в рамках моделей упругопластического анализа, не корректны. Более

перспективным для решения проблемы разрушения представляется феноменологический подход механики разупрочняющихся материалов [1]. Построение теории ведется здесь в традиционном для механики ключе и начинается с выделения нового свойства материала, а именно, стадии деформационного разупрочнения.

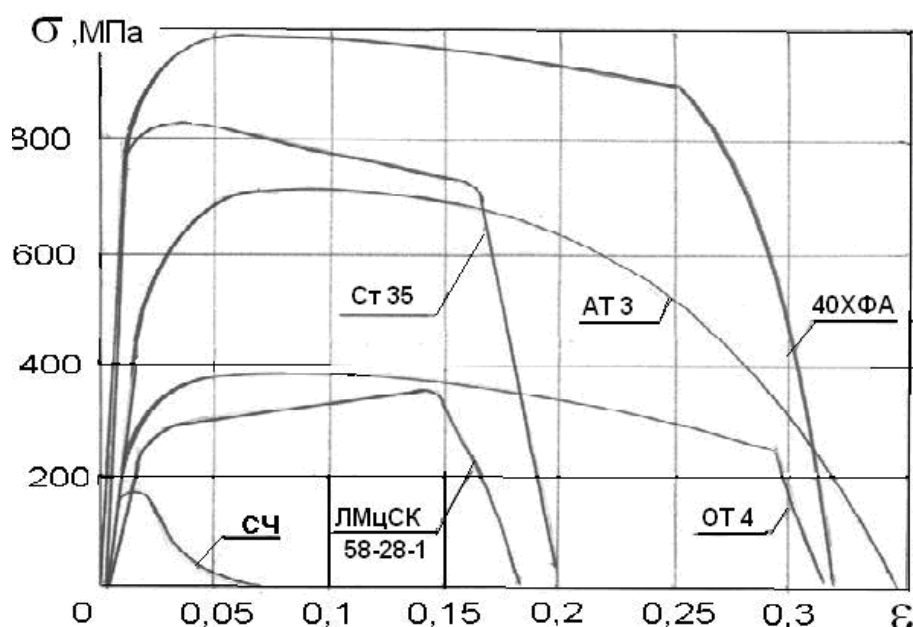


Рис.1 Экспериментальные ПДД сталей и сплавов

Указанная стадия реализуется в виде падающей ветви на машинной диаграмме в простых испытаниях на растяжение или кручение однократных образцов в достаточно жесткой испытательной машине [2]. Полные диаграммы деформирования (ПДД) с падающей до нуля ветвью построены для материалов разных классов (рис.1).

Зависимость результатов испытаний от условий нагружения указывает на то, что критерии разрушения материала не локальны и определяются не только его свойствами. Известно, что эффективно управлять свойствами материала можно путем изменения его структуры. В этой связи важно выяснить, каким образом микроструктура материала влияет на

сопротивление разрушению, почему и когда оно снижается у высокопрочных сталей, каким должен быть материал для живучих конструкций.

На качественном уровне ответы на поставленные вопросы можно получить, используя простую структурную модель материала для описания стадии разупрочнения. Деформационное разупрочнение характерно для структурно-неоднородного материала, обусловлено процессами структурного уровня, а на макроуровне проявляется в снижении несущей способности элемента материала при активном нагружении. Таким образом, сама физическая суть явления определяет необходимость использования для его моделирования структурно-феноменологического подхода.

Имея целью проведение качественного анализа процесса разрупрочнения, примем достаточно жесткие ограничения на свойства элементов модельного образца:

1.элементы, диаметры которых  $d_0$  малы по сравнению с их длиной  $l_0$ , плотно упакованы в пучок, моделирующий макроэлемент материала, и в процессе деформирования касаются друг друга без надавливания;

2.необратимые деформации стержней пренебрежимо малы (хрупкое разрушение в точке с координатами  $(\varepsilon_Z, \xi_B)$  на рис.2 а), а две части

разрушенного стержня упруго разгружаются и «раздвигают без надавливания» уцелевшие стержни, образуя пору;

3.модули упругости  $E$  и коэффициенты поперечной деформации  $\nu$  всех стержней одинаковы; прочностные свойства определяются плотностью распределения пределов прочности  $f(\xi_B)$ , заданной в интервале  $[S_1, S_2]$  (на рис.2б приведена плотность равномерного закона распределения  $\xi_B$ );

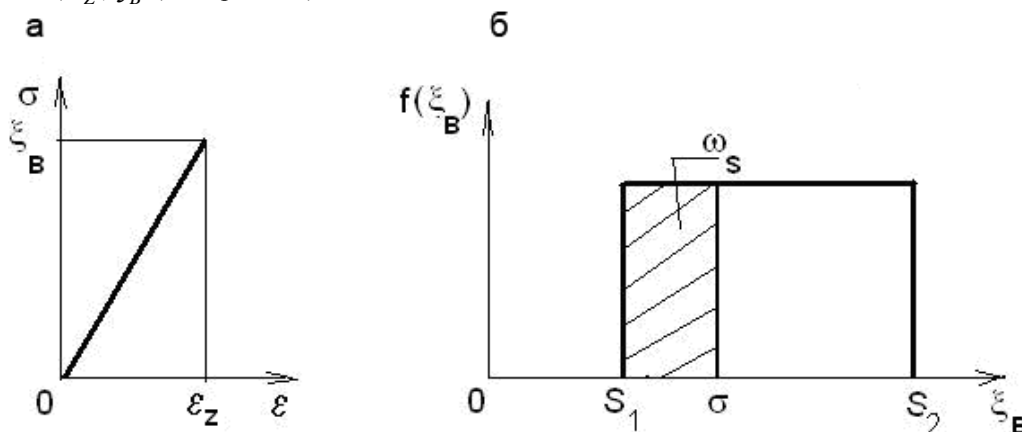


Рис.2 а) диаграмма деформирования элемента; б) плотность

Добавим еще, что принятые условия растяжения модельного образца предполагают однородность поля перемещений уцелевших

элементов. Тогда среднее напряжение в образце равно

$$\sigma = \{E\varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z1}; \quad E\varepsilon(1 - \omega_s), \quad \varepsilon_{Z1} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z2}\}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_{Z1} = S_1 E^{-1}; \varepsilon_{Z2} = S_2 E^{-1}. \quad \omega_s = \int_{S_1}^{\sigma} f(\xi_B) dS$$

объемная доля разрушенных стержней, определяемая в соответствии с первым ограничением.

Конкретный вид нелинейного участка функции (1) устанавливается заданием плотности  $f(\xi_B)$ . Но в любом случае диаграмма  $\sigma(\varepsilon)$  имеет

$$\sigma = \{E\varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z1}; \quad E\varepsilon(S_2 - E\varepsilon)(S_2 - S_1)^{-1}, \quad \varepsilon_{Z1} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{Z2}\} \quad (2)$$

Диаграмма растяжения образца из материала, отвечающего нелинейному участку модели (2), в координатах  $Q = \sigma A_0$ ,  $v = \varepsilon l_0$  (где  $A_0$ ,  $l_0$ -начальные площадь поперечного сечения и длина образца) имеет вид  $Q = av - bv^2$ , (3)

где  $a = A_0 E l_0^{-1} S_2 (S_2 - S_1)^{-1}$ ;  $b = A_0 E^2 l_0^{-2} (S_2 - S_1)^{-1}$ .

Приведенное выражение используется далее для анализа поведения системы машина - модельный образец в испытаниях на одноосное растяжение.

Вопросы устойчивости процесса деформирования образца в испытательной машине

как восходящую, так и падающую до нуля ветвь. Например, в соответствии со вторым ограничением, при равномерном законе распределения пределов прочности стержней  $R(S_1, S_2)$  имеем

ранее рассматривались с позиций теории катастроф [3]. Катастрофами называются скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий. Исследование равновесных состояний системы «машина, модельный образец» дополнительно выявляет роль структурной неоднородности в обеспечении условий устойчивого деформирования.

На рис.3а испытательная машина изображена в виде упругой пружины эквивалентной жесткости. Скачкообразное (катастрофическое) изменение параметров

состояния системы машина-образец ( $u$  и  $v$ , или  $v$ ), при монотонном изменении параметров управления ( $p$  или  $u$ ), связывается с частичным или полным разрушением образца. Теория катастроф объяснила зависимость наблюдаемых в эксперименте форм неустойчивости от числа управляющих параметров. При одном управляющем параметре поверхность состояний равновесия системы образует складку (рис.3б, 3в).

В случае мягкого нагружения силой  $p$  полная энергия системы машина-образец определится выражением

$$\Pi = \int_0^v Q dv + \frac{c}{2}(u-v)^2 - \int_0^u p du \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое – энергия деформации образца, второе – потенциальная энергия нагружающего устройства, третье – работа внешней силы  $p$ , взятая со знаком минус. Все положения равновесия системы определяются выражениями

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v} = Q - c(u-v) = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial u} = c(u-v) - p = 0 \quad (5)$$

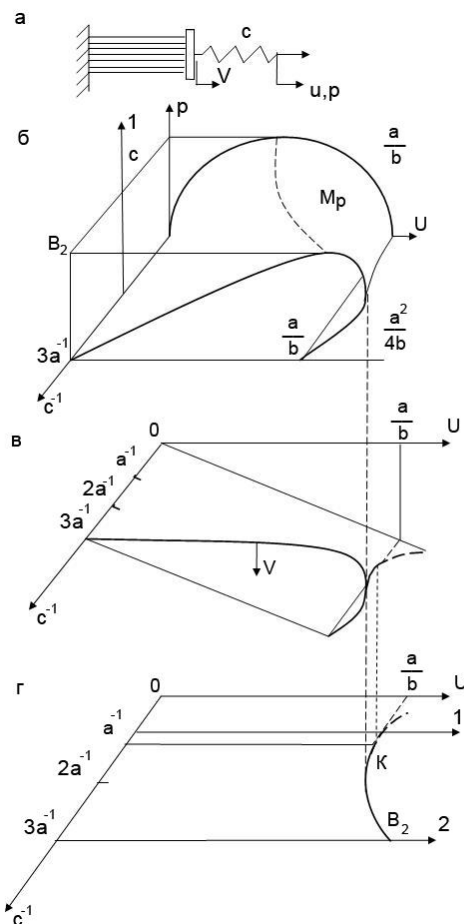


Рис.3 Катастрофа складки системы машина – образец

Совокупность критических точек ( $v, u, c, p$ ) функции  $\Pi$  (решений уравнений (5)) образует многообразие катастрофы, представленное поверхностью  $M_p$  на рис.3б. На поверхности выделены вырожденные критические точки (штриховая линия), которые делят ее на области устойчивых и неустойчивых равновесных состояний. Проекция штриховой линии в пространстве  $\{p, c\}$  представлена прямой критических точек системы  $B_2$ , параллельной горизонтальной оси  $c^{-1}$

$$p = p(v_1) = Q_{max}, \quad (6)$$

где  $v_1 = v_B$ .

Любой путь нагружения (прямая 1 на рис.3б) независимо от жесткости машины пересекает бифуркационную прямую  $B_2$  при  $Q = Q_{max}$ , где система теряет устойчивость деформирования. Состояния материала, отвечающие падающей ветви функции (2), при мягком нагружении не реализуются.

Иначе выглядит бифуркационная картина при жестком нагружении заданным перемещением  $u$  подвижного захвата машины (рис.3в, 3г). В этом случае бифуркационная кривая  $B_2$  в пространстве управления  $\{u, c\}$  (рис.3г)

$$u = \frac{(a+c)^2}{4bc}.$$

имеет экстремум в точке  $c=a$ , которая разделяет области устойчивого и неустойчивого деформирования системы машина-образец. Если выполнено условие  $c>a$ , то для образца из материала (2) можно построить на машинной диаграмме падающую до нуля ветвь (путь 1 на рис.3з). Произойдет равновесное, без динамики, разделение образца на две части. И наоборот, при недостаточной жесткости нагружающего устройства, путь деформирования системы (путь 2 на рис.3з) неизбежно пересечет линию  $B_2$ , где произойдет потеря устойчивости системы, связанная с динамическим разрушением образца. В момент разрушения образца удлинение  $v_*$  равно

$$v_* = \frac{a+c}{2b} = v_B + \frac{c(S_2 - S_1)l_0^2}{2A_0E^2}, \quad (7)$$

где  $v_B$ -удлинение образца на пределе прочности материала. В случае кинематического нагружения образца  $v_*=v_B$  только при бесконечно малой жесткости машины, или идеально однородном материале, когда  $S_2=S_1$ . Для структурно неоднородных конструкционных материалов  $v_*>v_B$  и, следовательно, реализуется падающая ветвь на машинной диаграмме. Положим  $v_*=v_p=a/b$  ( $v_p=2v_B$ ) и найдем жесткость

$$c_* = \frac{A_0ES_2}{l_0(S_2 - S_1)}, \quad (8)$$

необходимую для построения диаграммы с падающей до нуля ветвью. Чем меньше жесткость образца  $A_0E/l_0$  и чем выше неоднородность материала, оцениваемая разностью  $(S_2-S_1)$ , тем меньше жесткость  $c_*$  машины, требуемая для построения падающей ветви диаграммы растяжения, что вытекает из выражения (8). Из формулы (7) следует, что чем однороднее по структуре материал, тем больше вероятность динамического разрушения образца, то есть тем хуже сопротивление разрушению. Заметим также, что чем меньше разность  $(S_2-S_1)$ , тем круче падающая ветвь на диаграмме (3). В испытаниях реальных конструкционных материалов установлена тесная корреляционная связь между наибольшим углом наклона падающей ветви ПДД и трещиностойкостью материала [4].

Испытания специальных образцов в жестком нагружающем устройстве позволяют оценить прочность, пластичность, трещиностойкость и энергоемкость материала по соответствующим параметрам ПДД [5]. На рис.4 приведены полные осредненные по 8 – 10 образцам диаграммы ряда конструкционных сталей.

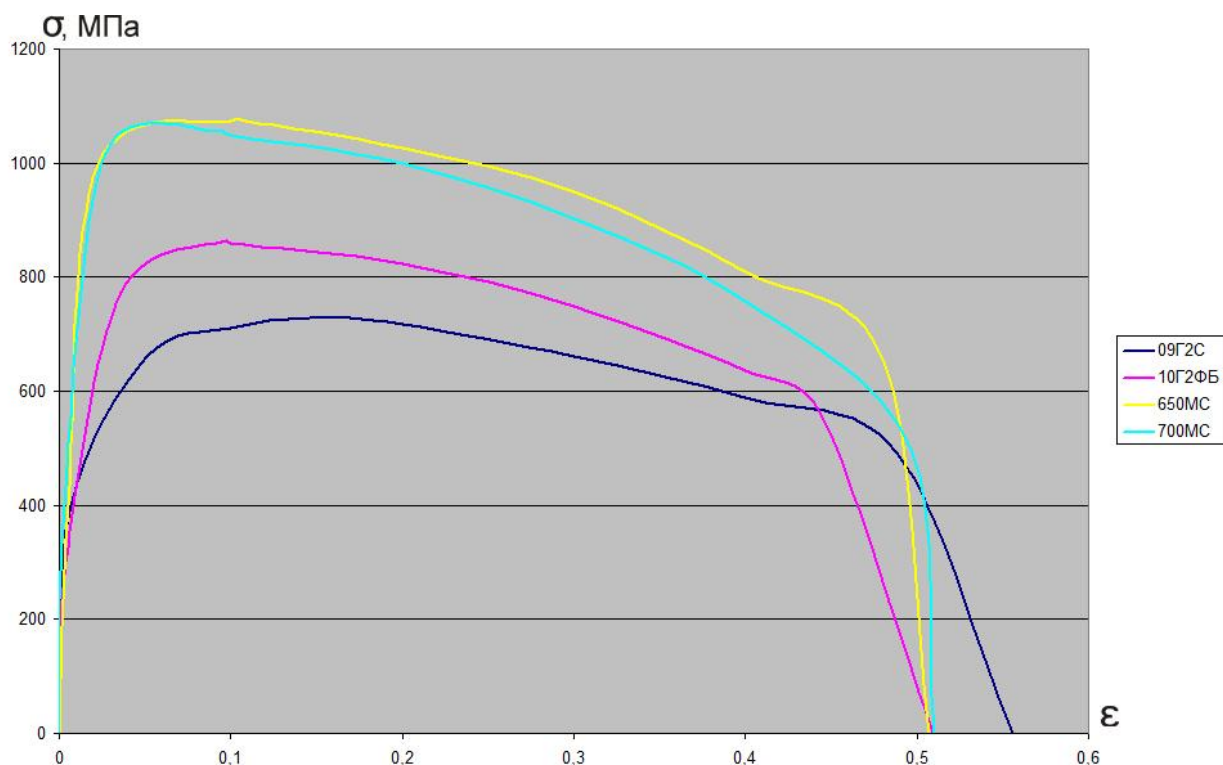


Рис.4 Полные осредненные диаграммы деформирования вагонных сталей

С точки зрения прочностных показателей новые качественные финские стали марок Optim650MC и Optim700MC значительно лучше отечественных. Все стали имеют сравнимые

показатели пластичности, оцениваемые длиной диаграммы. Сопротивление материала разрушению определяется наклоном завершающего участка падающей ветви полной диаграммы, зависящим от структурной неоднородности материала. Стали 09Г2С и 10Г2ФБ имеют близкие и достаточно хорошие показатели трещиностойкости, в отличие

от высокопрочных финских сталей. Повышение прочности сталей за счет получения однородной структуры при их производстве может привести к снижению показателей трещиностойкости.

Экспериментально установлено, что циклическое нагружение, понижение температуры, повышение концентрации водорода и другие эксплуатационные факторы, действующие на структуру металлов, приводят к изменению параметров ПДД. По этим изменениям в механическом эксперименте с построением ПДД определяется кинетика вызываемых ими деградационных процессов. В этом смысле испытания с построением ПДД дают единую методологическую базу для исследования одновременного действия нескольких внешних факторов, как это часто бывает в технике.

#### Список литературы

1. Волков С.Д. Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения / Свердловск: УНЦ АН СССР. Ин-т металлургии. 1986. 65с.

2. А.С.Г. 01 N 3/08 Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение / В.И.Миронов, В.А.Андронов, А.В.Якушев, В.Б.Бамбулевич: заявл.09.10.2003; опубл.10.05.2005, Бюл.№13-2005.

3. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург:Изд-во УрО РАН. 1995. 192с.

4. Лебедев А.А. , Чаусов Н.Г. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам падающих участков диаграмм деформаций //Пробл. прочности. 1983. №2. С.6-10.

5. Миронов В.И., Емельянов И.Г., Якушев А.В., Лукашук О.А. Разработка экспресс-метода для контроля свойств вагонных сталей // Транспорт Урала 2012. №2 (33). С.13-18.